第 36 卷　第 2 期　　中国腐蚀与防护学报　　Vol.36　No.2
2016 年 4 月　　Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection　　Apr.　2016

# 中国高放废物处置库甘肃北山预选区腐蚀研究用代表性地下水成分的确定

郑　珉[1,2]　张琦超[1,2]　黄彦良[1]　路东柱[1]　余秀明[1,2]　刘月妙[3]

1. 中国科学院海洋研究所　青岛　266071;
2. 中国科学院大学　北京　100049;
3. 核工业北京地质研究院　北京　100029

**摘要：** 通过对前人在北山地区已经进行的钻孔取样分析测试及野外调查资料进行归纳总结，获得了目前所研究的北山地区具有代表性的水样化学组成。结果表明，北山旧井地段3号钻井获得的水样成分可以代表北山地区的地下水总体情况，其中 $Na^+$，$Cl^-$ 和 $SO_4^{2-}$ 含量最高且差别不大，而 $K^+$ 和 $NO_3^-$ 含量普遍较低，含量较高组与含量较低组相差近4倍。$Cl^-$ 和 $SO_4^{2-}$ 一直是影响腐蚀程度的重点因子，甘肃北山地区代表性地下水成分的确定为以后进行北山地区高放废料储罐表面化学环境的模拟和储罐腐蚀研究奠定了基础。

**关键词：** 北山地区　地下水成分　地质处置　储罐　腐蚀

**中图分类号：** P641　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1005-4537(2016)02-0185-06

# Determination of Representative Ground-water for Corrosion Assessment of Candidate Materials Used in Beishan Area Preselected for High-level Radioactive Waste Disposal Repository

ZHENG Min[1,2], ZHANG Qichao[1,2], HUANG Yanliang[1], LU Dongzhu[1], YU Xiuming[1,2], LIU Yuemiao[3]

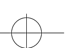
*1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;*
*2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
*3. CNNC Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China*

**Abstract:** Based on the data of previous analysis of groundwater samples by bore holing and the data of the field survey in Beishan area, the chemical compositions of the typical samples collected from ground waters in the desired sites were summarized in this paper. It can be drawn after a comparative evaluation of the content of the main anions and cations of ground waters that the groundwater sample collected from the third borehole in the Jiujing block can be considered as the representative of ground waters of Beishan area, therefore, which may be adopted in the near future as a medium for corrosion evaluation of candidate materials to provide a near-field chemical environment around the disposal waste container in high-level radioactive waste disposal repository of Beishan area.

**Key words:** Beishan area, groundwater composition, geological disposal, container, corrosion

**定稿日期：** 2015-03-13
**基金项目：** 国家自然科学基金项目 (51471160) 资助
**作者简介：** 郑珉，女，1990年生，硕士生
**通讯作者：** 黄彦良，E-mail：hyl@qdio.ac.cn，研究方向为海洋腐蚀与防护
DOI: 10.11902/1005.4537.2015.055





## 1 前言

随着核能在人类生活生产中的地位逐步上升，人类对于核能的需求也不断增大。在带来经济利益的同时，产生的大量核废料的合理处置成为了当前热点问题[1,2]。目前，通过对已经提出的几种处置核废料方案的筛选，国际上普遍接受的是深地质处置的方案[3]。

对于深地质处置而言，需要在地下深部进行巷道的挖掘，安置好核废料储罐后再进行缓冲回填[4]。在回填封闭储库后，随着时间的推移，之前营造的通风干燥的储库会被地下水再次侵入，不仅对工程屏障产生侵蚀破坏作用，还会成为放射性核素迁移的一种媒介[5]。对于这种处置库近域环境的影响，首先需要考虑的就是地下水中所含有的化学成分，进而才有依据对近域环境在时间上的演变进行模拟分析。

本文通过对前人在北山重点区域钻孔中获得的水样分析测试结果以及野外调查资料进行总结，并结合相关数据引用频率以及钻孔深度与深地质处置方式中储罐的埋藏深度关系进行综合评估，确定了我国高放废物处置库北山预选区腐蚀研究用代表地下水成分。

## 2 研究区整体概况

调查区位于甘肃省西部、河西走廊以北，主要隶属酒泉地区。南临河西走廊北缘的玉门镇-嘉峪关一线，北部延伸至马鬃山以北地区，东到额济纳旗黑河流域。地理坐标为北纬40°00′~42°00′，东经96°40′~98°40′[6,7]，见图1。

国内学者对高放废物地质处置甘肃北山预选场区的水文地质探查工作已经开展了一段时间。预选区年平均降水量60~80 mm；年内降雨极不均匀，集中在7~9月份，年平均蒸发量2900~3200 mm[8]。地下水大致可以划分为3种类型：分布最广的山地基岩裂隙水，水富集最丰富的沟谷洼地孔隙-裂隙水，以及盆地孔隙-裂隙水[9]。该区基岩裂隙水水位动态类型属于入渗-径流型，沟谷潜水属于入渗-蒸发-径流型[10]。对于地下水流向而言，北部地区地下水总体由西向东流动、中部地区主要由西北流向东南或自北向南流动，而在南部地区总体为由南向北流动[11]。岩体基质本身的渗透系数都很小，约为$10^{-10}$~$10^{-9}$ m/s，但具有裂隙的岩体渗透系数却相对较大，可达到$10^{-4}$~$10^{-7}$ m/s[12]。

## 3 研究区地下水概况

目前对于北山预选区的研究主要是对其重点地段而进行的，包括旧井、野马泉和新场-向阳山地段。对于地段的划分是根据区域地质、构造以及花岗岩体分布等因素确定的[13]。

### 3.1 北山地区钻孔情况

自2000年开始的北山一期钻孔，现在已经进入北山六期，共19个钻孔，其中8个为浅钻孔[14,15]。对于核废料储库而言，对其近域环境产生直接影响的是位于深部的地下水，所以以下钻孔主要是针对该地区深部的钻孔。

2000~2001年在甘肃北山旧井地区及其邻区开展较系统的水文地质调查，施工第一批深钻孔BS01、BS02和BS03孔，孔深分别为700，500和500 m[13,15]。

2002~2004年开展甘肃北山野马泉地段区域水文地质调查研究工作，施工北山第二批钻孔BS04孔，孔深为500 m[15]。

2005~2006年开展新场-向阳山预选场址水文地质调查。2008年在该厂址施工孔深均为600 m的BS05和BS06孔。2011年开始施工孔深600 m的BS15和BS16孔；在新场岩体施工孔深600 m的BS17，BS18和BS19孔[15]。

2014年7月18日18点甘肃北山BS20钻孔正式开钻，同时近期在沙枣园预选地段确定了BS20和BS21两个钻孔的位置，为北山六期项目下一步工作的如期开展奠定了基础[16]。

### 3.2 水化学特征

通过对各区域的地下水样分析，北山地区地下水pH值介于6.8~8.4，平均值为7.5；水温介于7~




**图1** 研究区位置示意图 (据郭永海、王海龙等修改，2014年)

**Fig.1** Location map of the study area

15 ℃[6]，利用钻孔双栓塞测试与实验技术取到钻孔深部地下水样品，通过分层抽水实验和时间系列定深采样工作，获得具有代表性的深层 (440 m) 地下水的年龄是在60 a以上的老水，水温在21～22 ℃变化[17]。地下水的矿化度变化范围较大，介于0.7~231 g/L之间，深层承压水比浅部潜水总溶解固体 (TDS) 低[12]。

### 3.3 地下水成分

对于北山地区地下水的化学成分研究主要依据在北山重点区域钻孔中获得的水样分析，目前已经获得大量数据。郭永海等[8]最开始根据35个水样的统计分析，得到了北山花岗岩分布区地下水常见的离子含量范围及其平均值；随后又针对野马泉地区4号井水样进行了进一步研究，获得了主要离子的平均质量浓度[18]以及400 m处[19]的常规离子含量。王海龙[12]也对北山地区钻孔水样成分进行了检测，总结了常见离子的含量范围及其平均值。

在对北山地区核废料储库的相关研究中也涉及到地下水成分的确定。杨森等[20]在分析甘肃北山地下水中Pu的形态分布及影响因素时用到的是甘肃北山地区最深的五一监测井获得的地下水化学成分。孙茂等[21]同样采用了五一井的水样成分对Np在北山地下水中的溶解度进行了分析。姜涛等[22]利用了北山3号井中的水样成分对不同外温度下Np(IV)在北山地下水中的溶解度进行了研究。周佳等[23]也利用了3号井中的水样，具体采用的是400 m深处的水样对还原氛围下U等元素的存在形式及矿物饱和指数进行了研究。刘月妙等[24]在处置库大型试验台架中对膨润土性能研究时所用到的水样是其在北山5号孔深度为24.24 m处获得的；核工业北京地质研究院分析测试研究中心对该水样进行了含量分析并获得了各离子含量。周志超[15]利用北山三期、四期和五期研究成果报告中提供的地下水化学组成对高放废物处置库北山预选区深部地下水成因机制进行了研究。

以上所提到的地下水组成见表1，表2为部分北山研究成果及整理结果。

以上化学组分表明地下水中主要的阳离子是$Na^+$，其次是$Mg^{2+}$和$Ca^{2+}$；而阴离子则以$Cl^-$和$SO_4^{2-}$为主。

## 4 数据分析

通过对已有北山地区地下水的组分含量数据进行比较，发现王海龙[12]检测得到的数据中$Mg^{2+}$和$SO_4^{2-}$含量明显偏高；而取自五一井中的水样测得的各种离子中除$K^+$和$NO_3^-$含量与其他数据接近外，其他常规离子含量显著偏少。故舍去这两组检测得到的数据而将其余几组数据和北山部分成果中各钻井常规离子含量平均值绘制成柱状图进行分析，见图2。

BS03属于北山地区旧井地段的钻井，深500 m；BS04属于野马泉地区钻井，深500 m；BS05和BS15均属于新场-向阳山地段钻井，深度都为600 m。从钻井深度来看，新场-向阳山地段的钻井水样分析得到的各组分含量更接近深地质处置的条件，但以从事有关北山地区核废料储库水文地质研究的科研人员所引用的数据来看，3号钻井和4号钻井所获得的地下水成分更受青睐；对于BS03和BS04两个地区获得的化学组分，4号井的要高于3号井以及更深处的5号和15号井的，同时3号井水样检测得到的数据与新场-向阳山地段的数据更为接近，所以可以选用旧井地段BS03获得的水样分析数据作为以后北

**表1 北山地区地下水相关分析测试数据以及引用数据**

**Table 1 Related analysis and test data and reference data about the contents of chemical components of groundwater in Beishan area**

(mg/L)

| Ion | $Na^+$ | $K^+$ | $Ca^{2+}$ | $Mg^{2+}$ | $HCO_3^-$ | $Cl^-$ | $SO_4^{2-}$ | $NO_3^-$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Reference[8] | 631.00 | 58.66 | 154.88 | 42.45 | 201.64 | 645.39 | 750.98 | 0.00 |
| Reference[12] | 1696.00 | 60.60 | 281.70 | 211.60 | 141.50 | 1869.40 | 2836.50 | 13.90 |
| Monitoring well 51#[20,21] | 47.83 | 8.88 | 73.88 | 8.98 | 103.70 | 61.35 | 161.80 | 10.42 |
| BS03[22] | 1101.00 | 14.40 | 241.00 | 51.70 | 133.00 | 1159.00 | 1418.00 | 19.10 |
| BS03-400 m[23] | 1036.00 | 15.95 | 183.00 | 50.40 | 130.90 | 1193.00 | 941.10 | 32.60 |
| BS04[18] | 1359.90 | 17.60 | 351.80 | 53.90 | 254.80 | 1801.40 | 1314.10 | 0.00 |
| BS04-400 m[19] | 1638.00 | 5.44 | 349.60 | 71.67 | 120.60 | 1701.00 | 1980.00 | 63.60 |
| BS05[24] | 798.00 | 4.80 | 177.00 | 31.40 | 0.60 | 771.00 | 718.00 | 8.64 |




表2 部分北山地下水成果数据[15]

**Table 2 Partial data about the chemical components of groundwater in Beishan[15]**

(mg/L)

| Ion | $Na^+$ | $K^+$ | $Ca^{2+}$ | $Mg^{2+}$ | $HCO_3^-$ | $Cl^-$ | $SO_4^{2-}$ | $NO_3^-$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BS03-1 | 1149.20 | 16.80 | 221.10 | 56.40 | 92.10 | 1271.00 | 1327.00 | 20.60 |
| BS03-2 | 1114.30 | 18.40 | 190.60 | 54.00 | 81.00 | 1310.00 | 1116.00 | 41.60 |
| BS03-3 | 1246.70 | 24.80 | 246.60 | 61.70 | 116.00 | 1203.00 | 1336.00 | 19.10 |
| Mean value | 1170.07 | 20.00 | 219.43 | 57.37 | 96.37 | 1261.33 | 1259.67 | 27.10 |
| BS05-1 | 484.00 | 8.81 | 128.00 | 24.00 | 200.00 | 557.00 | 538.00 | 14.70 |
| BS05-2 | 604.00 | 10.70 | 203.00 | 37.70 | 106.00 | 716.00 | 754.00 | 6.28 |
| BS05-3 | 646.00 | 11.10 | 205.00 | 38.50 | 113.00 | 762.00 | 815.00 | 3.95 |
| Mean value | 578.00 | 10.20 | 178.67 | 33.40 | 139.67 | 678.33 | 702.33 | 8.31 |
| BS15-1 | 887.00 | 15.00 | 158.00 | 33.30 | 142.00 | 862.00 | 1063.00 | 3.60 |
| BS15-2 | 892.00 | 8.89 | 170.00 | 39.20 | 148.00 | 989.00 | 1155.00 | 5.50 |
| BS15-3 | 921.00 | 10.10 | 181.00 | 42.80 | 150.00 | 1006.00 | 1220.00 | 0.00 |
| Mean value | 900.00 | 11.33 | 169.67 | 38.43 | 146.67 | 952.33 | 1146.00 | 3.03 |
| BS15-Z1 | 507.00 | 3.15 | 92.50 | 19.40 | 226.00 | 485.00 | 553.00 | 0.00 |
| BS15-Z2 | 494.00 | 2.91 | 108.00 | 19.10 | 232.00 | 511.00 | 543.00 | 0.00 |
| BS15-Z3 | 494.00 | 3.81 | 86.30 | 19.30 | 236.00 | 476.00 | 511.00 | 0.00 |
| BS15-Z4 | 524.00 | 4.69 | 56.20 | 20.90 | 319.00 | 472.00 | 465.00 | 0.00 |
| BS15-Z5 | 631.00 | 4.13 | 110.00 | 22.10 | 177.00 | 656.00 | 595.00 | 9.00 |
| BS15-Z6 | 363.00 | 3.00 | 41.10 | 11.80 | 240.00 | 300.00 | 318.00 | 9.95 |
| BS15-Z7 | 583.00 | 5.31 | 153.00 | 26.50 | 206.00 | 620.00 | 678.00 | 8.80 |
| Mean value | 513.71 | 3.86 | 92.44 | 19.87 | 233.71 | 502.86 | 523.29 | 3.96 |

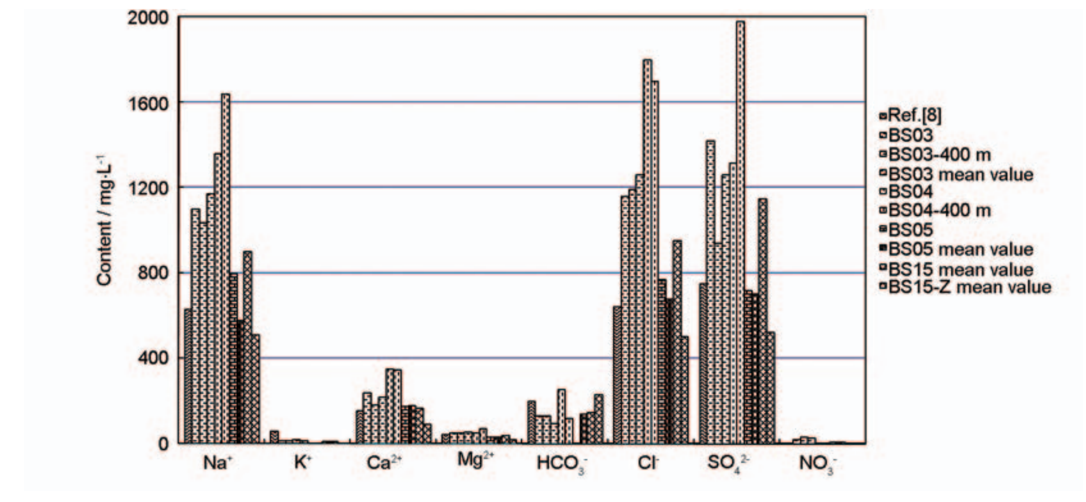



图2 地下水中常规离子含量

**Fig.2** Major ion contents of groundwater in Beishan area

表3 实验室配制与实际BS03水样离子含量比较

**Table 3 Comparison of chemical components of simulated solution and practical BS03 groundwater**

(mg/L)

| Ion | | $Na^+$ | $K^+$ | $Ca^{2+}$ | $Mg^{2+}$ | $HCO_3^-$ | $Cl^-$ | $SO_4^{2-}$ | $NO_3^-$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Simulated solution | | 1143.85 | 20.00 | 208.72 | 55.76 | 100.52 | 1291.33 | 1289.67 | 27.10 |
| BS03 groundwater | | 1170.07 | 20.00 | 219.43 | 57.37 | 96.37 | 1261.33 | 1259.67 | 27.10 |
| Differential | By content | −26.22 | 0.00 | −10.71 | −1.61 | +4.15 | +30.00 | +30.00 | 0.00 |
| | By percentage | 2.24% | 0.00 | 4.88% | 2.80% | 4.30% | 2.38% | 2.38% | 0.00 |

山地区核废料储库相关方面的研究依据。

## 5 北山地区地下水成分的模拟

王成祥[25]和王莹等[26]在对X80钢在土壤环境中的腐蚀研究中并未采用真实的土壤，而是自行配制土壤模拟液，获得了较为真实的腐蚀情况，可见对于土壤腐蚀而言选取土壤模拟液作为腐蚀介质具有一定的科学依据。所以对于北山地区核废料储罐的腐蚀研究也可以进行储罐附近的土壤环境模拟，进而得到储罐运行期间的腐蚀情况。

以BS03水样各组分的平均值作为基准进行地下水模拟液的配制需要选择含有相应离子的无机盐，可以选用钠盐、钾盐等常用组分。配制得到的溶液离子含量与BS03水样的对比如表3中所示。

## 6 结论

北山地区地下水是偏碱性的高矿化咸水，对于该地区地下水化学成分的确定需要对重点区段的深钻井水样进行分析测定。目前可获得的水样数据集中在旧井地段3号井、野马泉地段的4号井以及新场-向阳山地段的5号和15号井，通过对各钻井水样成分数据的比较以及引用程度、钻井深度的考虑，初步可将旧井地段的3号钻井获得的水样成分作为北山地区地下水成分的代表，其中$Na^+$，$Cl^-$和$SO_4^{2-}$含量最高且比含量普遍较低的$K^+$和$NO_3^-$高出近4倍。由此可以配制成需要的地下水模拟液，为日后北山地区核废料储库运行阶段的外部环境模拟分析和储罐腐蚀研究奠定基础。

## 参考文献


[1] Lu A Z. Annoying nuclear waste [J]. Popul. Sci., 2011, 75: 7
(陆安洲. 核废料令人头痛 [J]. 科学大众, 2011, 75: 7)

[2] Qu W P. Nuclear disposal concerns human security [J]. Security, 2008, 29(2): 24
(屈伟平. 核康料处置, 关系人类安全 [J]. 安全, 2008, 29(2): 24)

[3] Duquette D J, Latanision R M, Di Bella C A W, et al. Corrosion issues related to disposal of high-level nuclear waste in the Yucca mountain repository- peer reviewer's perspective [J]. Corrosion, 2009, 65(4): 272

[4] Bennett D G, Gens R. Overview of european concepts for high-level waste and spent fuel disposal with special reference waste container corrosion [J]. J. Nucl. Mater., 2008, 379: 1

[5] Li X. Study on solute transport based on the deep geological disposal of HLW [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009
(李寻. 基于高放废物深地质处置的溶质运移研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009)

[6] Zhao C H, Li G M, Guo Y H, et al. Regional groundwater flow pattern in Beishan area, Gansu province, China [J]. J. Eng. Geol., 2007, 15(2): 174
(赵春虎, 李国敏, 郭永海等. 甘肃北山区域地下水流动特征 [J]. 工程地质学报, 2007, 15(2): 174)

[7] Guo Y H, Wang J, Wang Z M, et al. Groundwater formation and distribution in the preselected Beishan area of repository for high level radioactive waste [J]. J. Geotech. Invest. Surv., 2008, 36(S1): 194
(郭永海, 王驹, 王志明等. 高放废物处置库甘肃北山预选区地下水资源的分布和形成 [J]. 工程勘察, 2008, 36(S1): 194)

[8] Guo Y H, Yang T X, Liu S F. Hydrogeological characteristics of Beishan preselected area, Gansu province for China's high-level radioactive waste repository [J]. Uranium Geol., 2001, 17(3): 184
(郭永海, 杨天笑, 刘淑芬. 高放废物处置库甘肃北山预选区水文地质特征研究 [J]. 铀矿地质, 2001, 17(3): 184)

[9] Guo Y H, Wang J, Xiao F, et al. Groundwater formation in Beishan (Gansu) preselected area of high-level radioactive waste disposal repository [J]. Geol. J. China Univ., 2010, 16(1): 13
(郭永海, 王驹, 肖丰等. 高放废物处置库甘肃北山预选区地下水的形成 [J]. 高校地质学报, 2010, 16(1): 13)

[10] Guo Y H, Wang J, Wang Z M, et al. The continuously determination of inorganic and organic carbon from samples for uranium geology by non-waterdrop decides [J]. Uranium Geol., 2010, 26(1): 46
(郭永海, 王驹, 王志明等. 高放废物处置库甘肃北山预选区地下水位动态特征 [J]. 铀矿地质, 2010, 26(1): 46)

[11] Dong Y H, Li G M, Li M. Numerical modeling of the regional ground water flow in Beishan area, Gansu Province [J]. Chin. Sci. Bull., 2009, 54(23): 3790
(董艳辉, 李国敏, 黎明. 甘肃北山大区域地下水流动模拟 [J]. 科学通报, 2009, 54(23): 3790)

[12] Wang H L. Study on water flow modeling and seepage characteristics of rock of Beishan preselected area for China's high level radioactive waste repository [D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 2014
(王海龙. 高放废物处置库北山预选区区域地下水流模拟及岩体渗透特征研究 [D]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2014)

[13] Xiao F, Wang J, Guo Y H, et al. Progress of hydrogeological studies in Beishan preselected area of disposal repository for high level radioactive waste in China [J]. Uranium Geol., 2011, 27(3): 185
(肖丰, 王驹, 郭永海等. 中国高放废物处置库甘肃北山预选区水文地质研究进展 [J]. 铀矿地质, 2011, 27(3): 185)

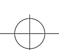
[14] Wang J. Geological disposal of high level radioactive waste in China: Review and prospect [J]. Uranium Geol., 2009, 25(2): 71
(王驹. 高放废物深地质处置: 回顾与展望 [J]. 铀矿地质, 2009, 25(2): 71)

[15] Zhou Z C. Deep groundwater formation mechanism of HLW repository in Beishan preselected area [D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 2014
(周志超. 高放废物处置库北山预选区深部地下水成因机制研究 [D]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2014)

[16] http://www.briug.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=22&id=493，2014-07-23/2014-12-24

[17] Pang Z H, Guo Y H, Su R, et al. Experimental study on cycle property of groundwater in fractured granite in Beishan, China [J]. Chin. J. Rock Mech. Eng., 2007, 26(2): 3954
(庞忠和, 郭永海, 苏锐等. 北山花岗岩裂隙地下水循环属性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 3954)

[18] Guo Y H, Wang J, Lv C H, et al. Chemical characteristics of

groundwater and water-rock interaction: Modeling of the Yemaquan preselected area for China's high level radioactive waste repository [J]. Earth Sci. Front., 2005, 12(Sl): 117
(郭永海, 王驹, 吕川河等. 高岗废物处置库甘肃北山野马泉预选区地下水化学特征及水-岩作用模拟 [J]. 地学前缘, 2005, 12(S1): 117)
[19] Guo Y H, Wang J, Liu S F, et al. Groundwater chemical characteristics of the Yemaquan section- the preselected area for China's high- level radioactive waste repository [J]. Atom. Energy Sci. Technol., 2004, 38(Sl): 143
(郭永海, 王驹, 刘淑芬等. 高放废物处置库预选区野马泉岩体地下水化学特征 [J]. 原子能科学技术, 2004, 38(S1): 143)
[20] Yang S, Wang Y L, Zhang Z C, et al. Form and distribution of Pu in underground water in Beishan, Gansu, and its influence factors [J]. Gold, 2014, 35(4): 75
(杨森, 王永利, 张志程等. 甘肃北山地下水中Pu的形态分布及影响因素 [J]. 黄金, 2014, 35(4): 75)
[21] Sun M, Chen T, Tian W Y, et al. Calculation and analysis of the solubility of Neptunium in Beishan well 51# groundwater [J]. J. Nucl. Radiochem., 2011, 33(2): 71
(孙茂, 陈涛, 田文宇等. 镎在北山五一井水中的溶解度计算分析 [J]. 核化学与放射化学, 2011, 33(2): 71)
[22] Jiang T, Yao J, Wang B, et al. Solubility of Np in Beishan groundwater at different temperatures [J]. J. Nucl. Radiochem., 2011, 33(2): 77
(姜涛, 姚军, 王波等. 不同温度下Np(VI)在北山地下水中的溶解度 [J]. 核化学与放射化学, 2011, 33(2): 77)
[23] Zhou J, Wang J, Su R, et al. Speciation of uranium an other elements saturation index of uranium minerals in the underground water from the granite fracture with reductive condition [A]. The Second Waste Underground Disposal Seminar [C]. Dunhuarg: 2008
(周佳, 王驹, 苏锐等. 还原氛围下U等元素的存在形式及矿物饱和指数的研究 [A]. 第二届废物地下处置学术研讨会[C]. 敦煌: 2008)
[24] Liu Y M, Wang J, Cao S F, et al. A large-scale THMC experiment of buffer material for geological disposal of high level radioactive waste in China [J]. Rock Soil Mech., 2013, 34(10): 2756
(刘月妙, 王驹, 曹胜飞等. 中国高放废物地质处置缓冲材料大型试验台架和热-水-力-化学耦合性能研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2756)
[25] Wang C X. Study of the behavior of stress corrosion of X80 steel in Yingtan soil environment [D]. Fushun: Liaoning Shihua University, 2010
(王成祥. X80钢在鹰潭土壤环境中的应力腐蚀行为研究 [D]. 抚顺: 辽宁石油化工大学, 2010)
[26] Wang Y, Yu H Y, Cheng Y, et al. Corrosion behavior of X80 steel in different simulated soil solution [J]. J. Mater. Eng., 2012, (1): 25
(王莹, 俞宏英, 程远等. X80钢在不同土壤模拟溶液中的腐蚀行为 [J]. 材料工程, 2012, (1): 25)



